第 38 卷第 4 期
2018 年 2 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38, No.4
Feb., 2018

DOI: 10.5846/stxb201701030015

丁丹,贾文雄,马兴刚,王洁.祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源.生态学报,2018,38(4):1348-1356.

Ding D, Jia W X, Ma X G, Wang J.Water source of dominant plants of the subalpine shrubland in the Qilian Mountains, China.Acta Ecologica Sinica, 2018,38(4):1348-1356.

祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源

丁　丹,贾文雄*,马兴刚,王　洁
西北师范大学地理与环境科学学院,兰州　730070

摘要:选取祁连山东部亚高山灌丛的 6 种优势植物:山生柳(*Salix oritrepha* Schneid)、头花杜鹃(*Rhododendron capitatum* Maxim)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、高山柳(*Salix cupularis*)、千里香杜鹃(*Rhododendron thymifolium* Maxim)和金露梅(*Potentilla fruticosa* Linn),利用稳定同位素技术及多元线性混合模型(Isosource)定量分析典型高寒区植物的水分来源。结果表明:乌鞘岭地区 7—8 月的大气降水线为 $\delta D=7.775\delta^{18}O+12.34$($R^2=0.871, P<0.001$),反映了该地区气温低,湿度大的气候特点;6 种优势植物的水分来源主要是降水,其次为 0—10cm 土壤水,地下水对各种植物水分的贡献率最小;6 种优势植物对各水源的利用在不同时段有差异,7 月份主要利用降水和浅层土壤水,而 8 月份各种植物的主要水源均为降水;绣线菊和头花杜鹃利用土壤水分的能力较强,头花杜鹃对地下水的利用率高于其他植物。

关键词:稳定同位素;植物水源;亚高山灌丛;祁连山

Water source of dominant plants of the subalpine shrubland in the Qilian Mountains, China

DING Dan, JIA Wenxiong*, MA Xinggang, WANG Jie
College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, *China*

Abstract: Water plays an important role in plant growth and distribution, and its resource selection is an important process in the botanical cycle. Although precipitation is the ultimate water source for all plants, factors like evaporation, altitude, geological aquifer features, and soil water characteristics may all influence values of stable hydrogen and oxygen isotopes (δD, $\delta^{18}O$). The water source used by a plant can be revealed by comparing the water δD and $\delta^{18}O$ values from stem xylem with those from the available water sources. Subalpine shrubland is an important vegetation type in the Qilian Mountains, and has high water-conservation capacity. Studies on the water source of the dominant plants of the subalpine shrubland in the Qilian Mountains contribute to understanding the water cycle and eco-hydrological process of subalpine shrubland. In this study, six species of dominant subalpine shrub plants in the eastern Qilian Mountains were selected to analyze the water sources of different plants in the same biotope landscape and the water source changes of the same plant in different growth stages using multivariate linear mixed models (Isosource). The local meteoric water line (LMWL) equation was $\delta D = 7.775\delta^{18}O + 12.34$ ($R^2 = 0.871$, $P < 0.001$), which showed that the study area has the characteristics of strong evaporation, low temperature, and high humidity. The results showed that the six dominant plant species mainly used precipitation during the entire growth season. Soil water from 0 to 10 cm was the second major water source. The contribution of groundwater was the lowest. The six dominant plant species changed the proportions of different water sources utilized during the growth season. In July, the six dominant plant species mainly used precipitation and shallow soil water. The

基金项目:国家自然科学基金项目(41161017)
收稿日期:2017-01-03;　**网络出版日期**:2017-11-12

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wxjiaxy@163.com

contribution rates of precipitation and 0—10cm soil water to *Spiraea salicifolia* L., *Rhododendron capitatum* Maxim, and *Rhododendron thymifolium* Maxim were similar, but the other three species mainly used precipitation. In August, the main water source of all six species was precipitation. The use of soil water in each soil layer from 10 to 80 cm by *R. thymifolium* and *S. salicifolia* decreased over time, whereas that by the other four plants first increased and then decreased with depth. The ability of *S. salicifolia* and *R. capitatum* to utilize soil moisture was strong. The use of groundwater by *R. capitatum* was higher than that by other plants.

Key Words: stable isotope; water source; subalpine shrub; Qilian Mountains

水是植物生长的关键因子,其变化会影响植物的生长情况和分布格局。跟踪和分析植物水分利用来源可以预测在水源发生变化的情况下植被时空分布的变化,有助于退化生态系统修复过程中植物的选择[1],进而为制定合理的气候变化对策提供科学依据。传统植物水分研究主要利用挖掘手段对植物根系进行直接研究[2],同时结合灌丛截流、蒸腾速率等多种因素对植物水分来源进行综合分析。此外,根据植物体水分指标,如植物叶片气孔导度、植物水势、树干液流等变化特征[1],也可判断植物水分来源。但这些方法在精确分析植物水分来源有一定的局限性,如植物根系的挖掘十分耗时,并对植物的部分造成破坏,而植物体水分指标会受多种环境因子及植物水分利用方式的影响。稳定同位素示踪技术具有较高的灵敏性和准确性,因此已成为示踪植物水分来源的有效工具[3]。

国外学者利用稳定同位素技术示踪植物水分来源较早,对不同生境、不同生活型和不同植物种的水分来源有较深入的研究。研究表明,大多数河岸植物的水分来源为混合型,植物的水源会随季节变化做出一定调整[4];在海岸沙漠区,雾水也可能是重要的水分来源[5];在温带地区,植物对地下水的利用有明显的季节变化等[6-7]。国内利用稳定同位素示踪植物水分来源起步较晚,但也取得了很多重要的研究成果。褚建民等对民勤和额济纳旗几种荒漠植物进行研究,认为在旱季白刺、梭梭、沙拐枣等对水源的选择有很大差异[8];李鹏菊等研究发现植物有更为长久有效的水分利用模式,即通过自身发达的根系吸收利用深层土壤水和地下水[9]。我国以往植物水分来源的研究主要集中在干旱半干旱区和湿润区,对高寒区的研究比较少。赵国琴等对青海湖流域具鳞水柏枝的水分来源开展了研究,发现生长在河岸边的具鳞水柏枝对地下水和河水依赖程度较高,而距离河岸约 100m 时对土壤水的利用量较多[10]。在同一生境下,不同植物对水分的利用存在差异,水分有限时会形成竞争,因而有必要研究同一群落中不同植物种的水分利用,从而全面认识水分因子对植物分布和生存的影响。

亚高山灌丛是祁连山重要的植被类型,具有较高的水源涵养能力,但在气候变化影响和农牧活动干扰下,灌丛退化和破坏状况较为严重[11],这对寒区的水文过程有一定影响。本文对祁连山东部亚高山灌丛 6 种优势植物的水分来源进行定量分析,对同一生境下不同植物的水分来源及不同时段同种植物选择水源的变化进行深入探讨,旨在全面了解高寒区的水循环及亚高山灌丛的生态水文过程,为亚高山地带的生态恢复和环境建设提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于青藏高原东北边缘的祁连山东段,甘肃省天祝藏族自治县抓喜秀龙乡境内的亚高山灌丛(102°47′25″E,37°10′19″N,海拔 3009.3m)。境内地形西高东低,具有山地和河谷两大地形。气候寒冷潮湿,年均温-0.1—1.2℃,极端最低气温-34.9℃,极端最高温度 28℃,>0℃的年积温 1380℃,年日照时数 2600h;年降水量 4160mm,主要集中在 7—9 月,植物生长季为 120—140d;年蒸发量 1592mm,无绝对无霜期,仅分冷、热两季。土壤以亚高山草甸土、亚高山黑钙土等为主。在海拔 3050m 以上的山地阴坡成带分布高寒杜鹃灌丛草甸和高寒柳灌丛草甸,阶地与河谷带分布有金露梅灌丛草地,阳坡则以高寒草甸草原为主。

1.2　采样方法

选取当地六个优势种为研究对象：山生柳（*Salix oritrepha* Schneid）、头花杜鹃（*Rhododendron capitatum* Maxim）、绣线菊（*Spiraea salicifolia* L.）、高山柳（*Salix cupularis*）、千里香杜鹃（*Rhododendron thymifolium* Maxim）和金露梅（*Potentilla fruticosa* Linn）。在 2015 年 7 月 23 日、8 月 2 日、8 月 14 日开展样品采集。为了尽量减少光照等外界因素对同位素分析结果产生影响，采样在 9:00—11:00 完成。选择生长状况良好、高度等较一致的同种植物 3 株，每株剪取 5—7 枝直径约 0.3cm、长度约 5cm 的栓化枝条，迅速剥去表皮后，立即装入 10mL 带螺纹口的塑料瓶中，并用 parafilm 封口膜封口，冷冻保存。在采样植株附近，选择 3 个地势相对均一的地点，分别采取 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60、60—70、70—80cm 土层的土壤，一部分立即装入 10mL 带螺纹口的塑料瓶中，并用 parafilm 封口膜封口，冷冻保存，用于抽提水分，另一部分装入铝盒，用于烘干法测定土壤含水量。收集距采样点最近（约 60m）的 8m 深井的井水作为地下水样品，并采集距样地最近（约 150m）的金强河支流为河水样品。降水样品采用气象站的标准量雨筒收集，2015 年 7 月 10 日至 8 月 14 日共收集 11 次。地下水、河水和降水装入 10mL 带螺纹口塑料瓶后，用 parafilm 封口膜封口，冷藏保存。所有样品均取 3 个平行样。

1.3　水分提取和同位素测定

植物和土壤水分的抽提及不同水体的 δD、$\delta^{18}O$ 测定均在西北师范大学稳定同位素实验室完成。用低温真空蒸馏法（LI-2000 全自动真空冷凝抽提系统进行水分抽提装置（北京理加联合科技有限公司））提取植物及土壤水分。用 DLT-100 液态水同位素分析仪（Lios Gatos Research, Mountain View, USA）测定各水体的 δD、$\delta^{18}O$。其中，δD 值的测试误差不超过 ±0.6‰，$\delta^{18}O$ 值得测试误差不超过 ±0.2‰。用 LWIA-Spectral Contamination Identifier v1.0 软件对测定数据进行光谱污染修正。分析得出的 δD、$\delta^{18}O$ 是同标准平均海洋水 SMOW 的千分差，测定精度为 0.3%。

1.4　数据分析方法

不同水源对植物的贡献率用多源线性混合模型（IsoSource）计算。该模型由 Robert Gibsion 公司开发，通过设置很小的增量（1%或 2%），将所有可能的贡献率组合全部列出，然后与混合水的同位素值进行对比，如果差值小于容差，则认为是可行解[12]。计算时将增量设为 1%，容差设为 0.01。所有样品 $\delta^{18}O$ 变化范围为 −9.32%—5.89%，δD 的变化范围为−57.67%—9.63%。氧同位素的变化范围相对较小，在样品测定时氢同位素的误差比氧同位素的大，且在氢和氧的 δ 值同时输入 Isosource 时发现几乎没能得出结果，因此认为单独利用氧同位素计算不同水源对植物的贡献率会更准确[13-14]。

降水 $\delta^{18}O$ 值采用加权平均法，将植物取样前 12d 的降水作为可能水源，每次降水量作为权重，计算降水 $\delta^{18}O$ 的加权平均值。不同种类植物及不同水源氢氧同位素值差异的显著性用 SPSS 21.0 进行分析。

2　结果与讨论

2.1　不同水体的同位素特征

祁连山东部亚高山灌丛样地所有样品 $\delta^{18}O$ 的平均值为（−7.08±0.74）‰（mean±SE 下同），δD 平均值为（−44.93±3.43）‰。朱建佳等计算出青海格尔木样地的 δD 平均值为（−68.3±1.85）‰，$\delta^{18}O$ 的平均值为（−6.10±0.34）‰[13]，而朱秀勤发现云南省中部的喀斯特样地的 δD 平均值为−72.19‰，$\delta^{18}O$ 的平均值为 −10.26‰[15]，这与本研究结果有所不同，表明在不同区域的水体中 $\delta^{18}O$、δD 值差异较大。不同水源稳定氢氧同位素比率差异显著（表 1），且不同时段不同土层土壤水的氢氧同位素比率差异显著（表 2）。头花杜鹃的 $\delta^{18}O$ 最低，绣线菊和高山柳的 $\delta^{18}O$ 略高，山生柳、金露梅和千里香杜鹃的 $\delta^{18}O$ 相近，比前 3 种植物略高；而绣线菊的 δD 最低，千里香杜鹃 δD 最高；各植物 δD 的平均值为（−43.89±1.06）‰，$\delta^{18}O$ 平均值为（−5.34±0.16）‰。不同时段不同植物水分的氢氧同位素比率差异显著（表 3）。降水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值较高，土壤水与植物水分的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值较低，而地下水与河水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值更低，可见降水在降落地表后，下渗土壤和植

物蒸腾作用,形成地表和地下径流过程中,稳定同位素进一步发生分馏而导致明显贫化。

表 1　祁连山东部亚高山灌丛地带不同水体中氢氧同位素比率(mean ±SE)/‰

Table 1　Hydrogen and oxygen stable isotope ratio in different water in alpine shrub area in the east region of Qilian Mountains (mean±SE)

不同水体 Different water bodies	日期 Date (month/day) 7/23		8/2		8/14	
	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$
降水 Precipitation	−21.9 ±1.69a	−4.75 ±0.79a	−0.7 ±3.80c	−1.03 ±1.08a	−12.93 ±4.04a	−3.29 ±0.24a
河水 River water	−52.46 ±0.21b	−8.84 ±0.55b	−52.81 ±0.31b	−8.73 ±0.14b	−52.05 ±0.07b	−8.72 ±0.42b
地下水 Groundwater	−54.79 ±0.22b	−8.83 ±0.30b	−54.53 ±0.25b	−9.10 ±0.03b	−55.29 ±0.11b	−9.32 ±0.45b
土壤水 Soil water	−45.19 ±1.05c	−7.12 ±0.44c	−50.37 ±0.90b	−8.01 ±0.63b	−45.75 ±1.62c	−7.51 ±0.78b

同列(同行)不同字母表示差异显著(P<0.05)

表 2　土壤剖面水氢氧稳定同位素比率的变化(mean ±SE)/‰

Table 2　The variation of hydrogen and oxygen stable isotope ratio in soil water along soil profile (mean±SE)

土壤层 Soil layer/cm	日期 Date (month/day) 7/23		8/2		8/14	
	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$
0—10	−35.49±2.85a	−4.98±0.58a	−44.06±1.79b	−6.93±0.51a	−35.49±2.34a	−5.53±0.60b
10—20	−48.70±2.07b	−7.52±0.30b	−49.65±2.11ab	−8.28±0.45b	−43.03±1.87b	−7.25±0.29a
20—30	−46.43±0.72b	−4.98±0.89a	−46.94±0.83ab	−7.78±0.97b	−44.57±1.05b	−7.52±0.65ba
30—40	−47.71±1.45b	−7.52±0.07b	−48.12±0.90ab	−7.44±0.20b	−43.57±1.26b	−7.27±0.35a
40—50	−45.42±1.08b	−7.10±0.16b	−48.12±1.01ab	−7.66±0.25b	−44.54±0.56b	−7.40±0.04a
50—60	−46.05±1.05b	−7.57±0.12b	−51.53±1.02ab	−7.99±0.39b	−44.86±0.94b	−7.67±0.35a
60—70	−45.71±0.75b	−7.52±0.45ac	−57.67±0.65c	−9.05±0.60bc	−52.40±0.59c	−8.57±0.81c
70—80	−46.01±1.73b	−7.63±0.41ac	−56.87±1.52c	−8.89±0.13c	−57.51±1.33c	−8.87±0.27c

同列(同行)不同字母表示差异显著(P<0.05)

表 3　不同植物水分的氢氧同位素比率(mean ±SE)/‰

Table 3　Hydrogen and oxygen stable isotope ratio in different plant water (mean±SE)

植物种类 Dominant plant species	日期 Date (month/day) 7/23		8/2		8/14	
	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$	δD	$\delta^{18}O$
山生柳 *S. oritrepha* S.	−45.78±1.35a	−5.25±0.14a	−45.05±0.84a	−4.87±0.09a	−43.55±0.62b	−4.81±0.10b
头花杜鹃 *R. capitatum* M.	−45.11±1.40a	−6.03±0.11b	−41.25±1.22a	−6.31±0.15b	−41.76±1.44b	−5.85±0.08a
绣线菊 *S. salicifolia* L.	−51.75±2.05b	−6.33±0.36b	−45.41±0.70a	−5.10±0.70b	−48.47±0.78a	−5.46±0.51a
高山柳 *S. cupularis*	−49.40±0.94*b*	−6.17±0.54*b*	−44.77±0.65*a*	−5.52±0.22*b*	−39.97±1.36*c*	−4.32±0.52*c*
千里香杜鹃 *R. thymifolium* M.	−43.95±0.80a	−6.16±0.61b	−38.91±2.21b	−4.96±0.0.41ab	−32.63±1.08c	−4.04±0.34c
金露梅 *P. fruticosa* L.	−48.91±1.51b	−5.20±.0.65a	−44.09±0.86a	−5.09±0.57a	−39.35±.0.43c	−4.75±0.54b

同列(同行)不同字母表示差异显著(P<0.05)

2.2　不同水体之间的补给关系

根据降水样品 δD 与 $\delta^{18}O$ 建立祁连山东部亚高山地带 7—8 月的大气降水线(图 1):$\delta D = 7.775\delta^{18}O + 12.34$($R^2 = 0.871$,$P<0.001$)。大气降水方程的斜率稍小于全球平均值,说明该地区蒸发较强,而截距高于全球平均值,说明该地区气温低、湿度大。祁连山亚高山地带属于高寒地区,海拔较高导致气温较低,空气湿度大,并且深居内陆地区,强烈蒸发造成大气水线方程的斜率较低。由于地下水水位较浅,河水、雨水渗入量较大,地下水和河水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值略偏小,位于大气降水线的左上方,但紧靠大气降水线,说明降水对河水和地下水都有补给作用[16]。植物水的大部分点位于大气降水线的右下方,说明在植物蒸腾作用的过程中同位素富集较明显。除土壤水的少量点离大气降水线较远外,其余都分布于大气降水线附近,说明降水对土壤水有较明显的补给作用。

祁连山亚高山地带降水的 δ18O 值相对较高,这是因为夏季水汽辐合能力较强,雨滴在降落过程中蒸发强烈,使得 δ18O 较高的局地水汽进入降水云团[17],因此降水的 δ18O 值偏高。除少数点外,土壤水点分布在大气降水线上,这表明降水对土壤水有补给。降水可以直接补给土壤水,有研究认为较小的降雨量(<5mm)只能起到缓解旱情的作用[18]。乌鞘岭 2015 年全年降水量为 4188mm,较 2014 年全年降水量减少 716mm。研究区降雨具有明显的季节变化特征,夏季降水较多,约占全年总降水量的 54%,冬季降水量不足年降水量的 5%。其中 7 月总降水量为 736mm,是全年月平均降水量的 2.1 倍,占全年总降水量的 17.6%,8 月总降水量为 543mm,占全年总降水量的 13%。采样过程中收集到 11 次降雨(图 2),总降水量为 223mm,最少的一次为 13.7mm,最多的一次达 32.5mm,有 6 次超过 20mm,较多的降水很好地补给了土壤水分。样地河水样品中 δ18O 的变化范围是-9.03%—-8.42%,地下水样品中 δ18O 的变化范围是-9.32%—-8.53%,而降水样品中 δ18O 的变化范围是-8.26%—-0.76%,地下水与河水的 δ18O 值波动范围较小,且十分接近,说明在祁连山亚高山地带河水和地下水的补给来源是降水。

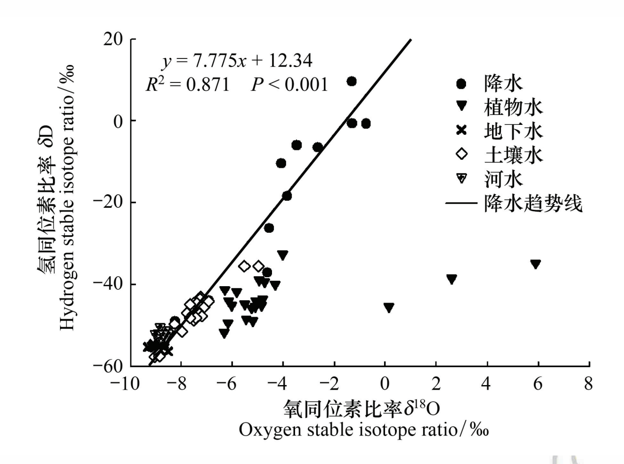


图 1 祁连山东部亚高山灌丛地带不同水体中 δD 和 δ18O 的关系

Fig.1 δD-δ18O plots of precipitation, soil water, ground water and plant water in subalpine shrub area of eastern Qilian Mountains

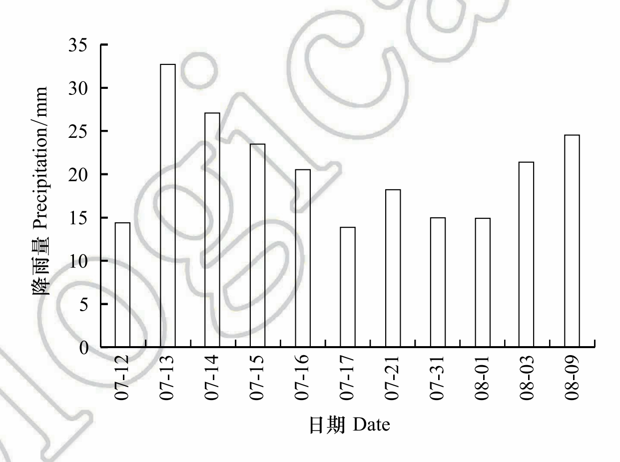


图 2 祁连山东部亚高山灌丛地带 2015 年 7—8 月降水量

Fig.2 Precipitation from July to August in 2015 in the subalpine shrub area of eastern Qilian Mountains

2.3 不同种类植物水分来源

植物可利用的水源有降水、土壤水、地下水和河水,各水源的氢氧同位素差值均大于实验误差[19]。假设降水、土壤水、地下水和河水都是相对独立的水源,可定量分析植物对各水源的利用情况。在计算时发现,河水对各植物的平均贡献率均不及 0.5%,且样地的位置比河流高,因而忽略河水对植物的影响。

从植物水分来源的比率来看(图 3),样地的 6 种植物水分来源不完全相同,主要水分来源为降水和土壤水,其中降水的贡献率最大,表层土壤水次之,地下水的贡献率最小,平均约为 5.4%。降水对各植物水分来源补给具有明显优势,这与 7、8 月份降雨的持续影响有关。7 月 10 日至 22 日共采集到降雨 7 次,8 月 1 日至 14 日共采集到降雨 4 次,每次降雨时间历时较长,雨量较大,对植物吸收降水有一定影响。山生柳(降水 53.6%、0—10cm 土壤水 16.37%,下同)、高山柳(45.03%、14.2%)、千里香杜鹃(50.23%、13.2%)、金露梅(54%、16.03%)的主要水源是降水和表层土壤水,相比之下降水更占优势,而头花杜鹃(29.5%、18.8%)和绣线菊(36.33%、15.47%)的主要水源也是降水和表层土壤水,但同前四种植物相比,两者对植物的贡献率有所降低。

6 种植物对土壤水分的利用是一致的,随着土层的加深,植物对土壤水分的利用逐渐减少。总体来看,植物对 0—10cm 土壤水的利用率最高,对 10—20cm 土壤水的利用率减少,对 20—30cm 土壤水的利用率略有增加,对 30—40cm 土壤水的利用率又达到一个次高值,之后随着土层的加深对土壤水的利用率逐渐降低。虽然每种植物对各土层水分利用的比例不尽相同,但对 10—80cm 土壤水的利用都较为平均。从对土壤水利用

的平均比例来看,头花杜鹃、绣线菊、高山柳、千里香杜鹃对土壤水的利用率相对较高,而山生柳和金露梅对土壤水的利用率相对较低。

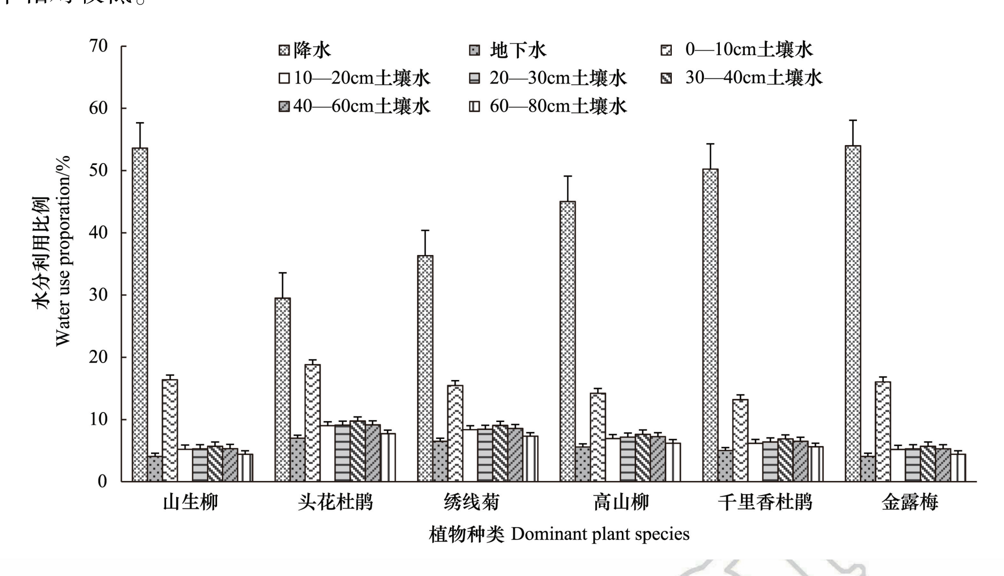


图 3　祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源的比率

Fig.3　Water source percentage of dominant plant species in the subalpine shrub area of eastern Qilian Mountains

通常情况下,植物对水分的吸收与其根系的分布有关。浅根植物主要利用表层土壤水,深根植物主要利用深层土壤水和地下水[20-21]。头花杜鹃侧根较少,较粗的根多扭曲穿行于 10—20cm 的土层,曹文侠等研究指出在 7—8 月 0—10cm 活根占 0—30cm 总活根的 53%—77%,细根主要集中在表层内以获取水分和养分[22],本研究也表明 0—10cm 土壤水对头花杜鹃的贡献率占总土壤水贡献率的 26.8%。千里香杜鹃的主根系分布在 0—20cm 的浅层土壤,李文等研究发现 10—20cm 土层为千里香杜鹃活根比值最高的土层[23],这与本次研究结果基本一致,0—20cm 土壤水对千里香杜鹃的贡献率占总土壤水贡献率的 32.9%。金露梅将大部分地下根系分布在 0—20 cm 深的表土层中,周华坤等研究发现金露梅大量的活根都位于 0—20cm 土层,大部分养分和水分通过这些活根汲取[24],本研究也表明 0—20cm 土壤水对金露梅的贡献率占总贡献率的 30.7%。绣线菊的主根相对粗壮,中细根发达,仇瑶等研究发现绣线菊在吸收水分、养分方面发挥重要作用的中根、小根、细根占总根 25%[25],这与本次研究结果也是一致的,因为绣线菊对总土壤水的利用率达 69.8%,在 6 种植物中仅次于头花杜鹃。山生柳和高山柳的主根相对较细,侧根较发达,但高山柳对 0—80cm 土壤水的利用率高于山生柳。总体来看,祁连山亚高山灌丛主要利用浅层土壤水,这与根系的分布基本一致,因为灌木的中细根系发达,而且以侧根分布为主,集聚于浅层土壤中的根系更有利于吸收土壤水分。

2.4　植物水分来源随时间的变化

不同植物在各生长阶段对水分的利用情况并不相同,祁连山东部亚高山灌丛 6 种优势种对各水源的利用也是如此(图 4)。本研究的采样时间为 7 月 23 日至 8 月 14 日,是所选优势种生长的旺盛时期。6 种优势植物均主要利用降水和浅层土壤水,但不同植物对水源的选择有明显的时间变化。

7、8 月研究区降雨次数多,雨量大,虽然 6 种植物对降雨的利用率不同,但降雨均为六种植物的主要水源。7 月 23 日,降雨对山生柳、头花杜鹃、绣线菊、高山柳、千里香杜鹃、金露梅的贡献率分别为 54.9%、29.4%、22.8%、26.1%、26.4%、57.6%,而到 8 月 14 日,降雨对这 6 种植物的贡献率分别为 61.2%、35.1%、44.8%、73.6%、80.9%、62.8%,与 7 月相比有明显增长。一般来讲,降水不是植物的稳定水源,但在乌鞘岭地区降水对 6 种植物都有较高的贡献率,表明植物在利用土壤水、地下水等稳定水源的同时,也会充分利用降水等不稳定水源。

土壤水是植物最直接的水源[16],土壤水分的变化直接影响根系对水分的吸收。对比不同土层的含水量

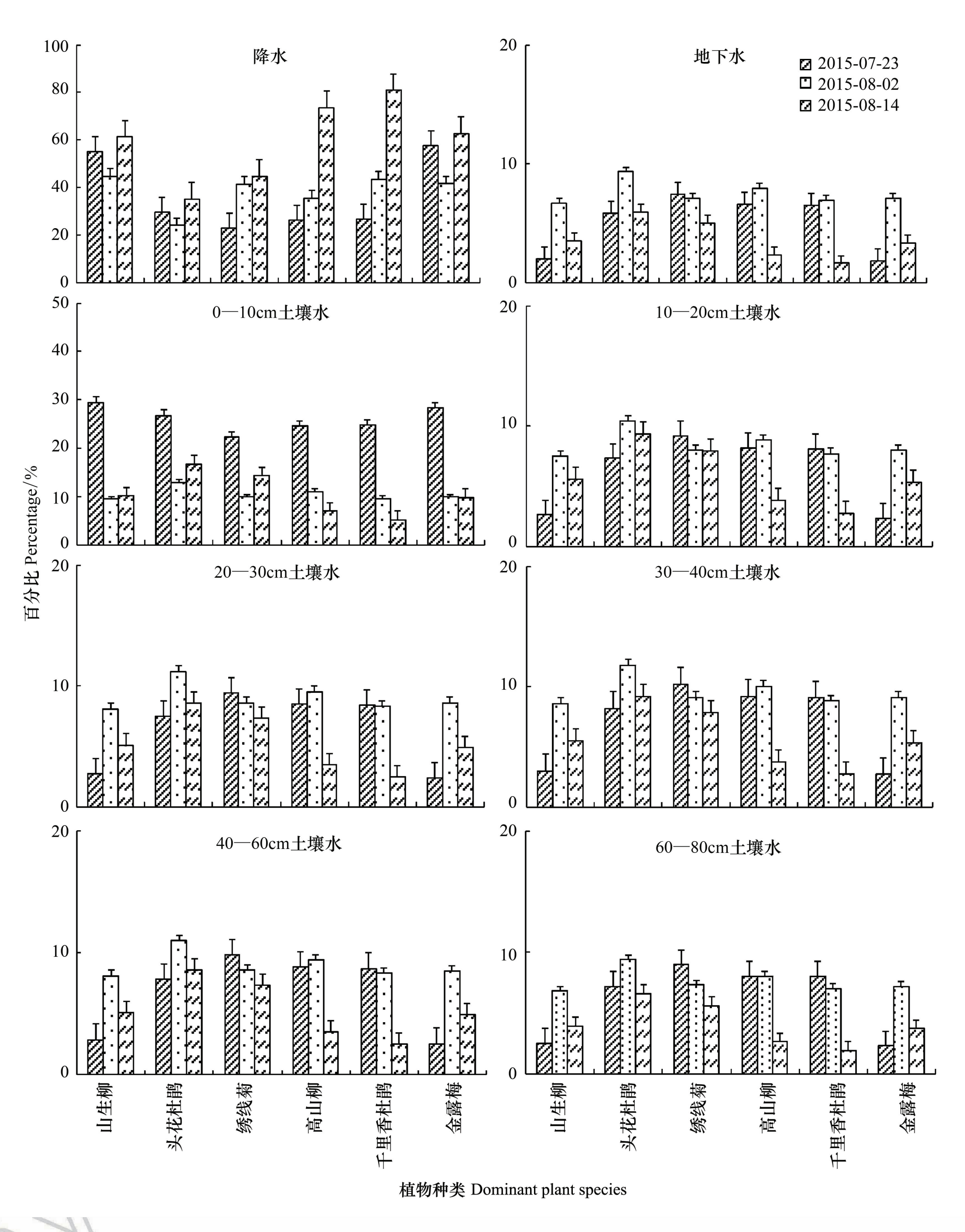


图 4 祁连山亚高山灌丛优势植物不同时期水分来源的比率

Fig.4 Water source percentage of dominant plant species in the subalpine shrub area of eastern Qilian Mountains in different times

(图 5),将土壤水分垂向分布划分为 0—40、40—80cm 两个区间。不同时期 0—30cm 土壤含水量均较高,说明样地的土壤持水性较好且土壤质地较细。含水量高可能是因为采样工作在降雨事件结束后不久,且在采样前一周持续降雨,中间经历的蒸发作用较少,降水来不及向深处入渗。8 月 2 日、14 日各土层含水量均不及 7 月 23 日,这与降水次数及雨量的减少有关。7 月 23 日金露梅对 0—10cm 土壤水的利用率为 28.4%,8 月 2 日和 14 日对 0—10cm 土壤水的利用率为 9.9%和 9.8%,7 月 23 日山生柳对 0—10cm 土壤水的利用率为 29.5%,8 月 2 日和 14 日对 0—10cm 土壤水的利用率为 9.5%和 10.1%。与 7 月相比,其他 4 种植物对 0—10cm 土壤水的利用率在 8 月也都有所降低,说明土壤含水量的减少会引起植物对土壤水分利用的变化。在这其中头花杜鹃和绣线菊对其利用率的减幅较小,说明二者能更充分的利用浅层土壤水。此外,随着时间的变化,高山柳、

头花杜鹃、山生柳、金露梅对 10—40cm 各土层土壤水的利用呈先增加后减少的趋势,而千里香杜鹃和绣线菊对其利用率随着时间的变化持续减少,与其他 4 种植物相比利用 10—40cm 土壤水的能力较差。不同时期 40—80cm 各土层的含水量随着土层加深逐渐减少。60—80cm 土壤含水量与其他土层相比较少,一方面与降水补给深度不足有关,对比降水的 $\delta^{18}O$ 与 60—80cm 土壤水的 $\delta^{18}O$,发现差别较大,说明该地区的降水不足以补给 60cm 以下的土壤层,另一方面与地下水水位较低有关,因此 60—80cm 土壤含水量较小。6 种植物对 40—80cm 土壤水的利用与 10—40cm 土壤水的利用一致,即高山柳、头花杜鹃、山生柳、金露梅对各层土壤水的利用率在 8 月 2 日达到一个小峰值,但千里香杜鹃和绣线菊对其利用呈减少趋势,这是因为亚高山灌丛根系分布相对较浅,植物对深层土壤水的利用与土壤含水量密切相关,8 月 2 日深层土壤水的含水量较大,对植物的贡献率也较大,但绣线菊和千里香杜鹃对深层土壤水的利用不同于金露梅等植物,可能还与其他植物的水分竞争有关。

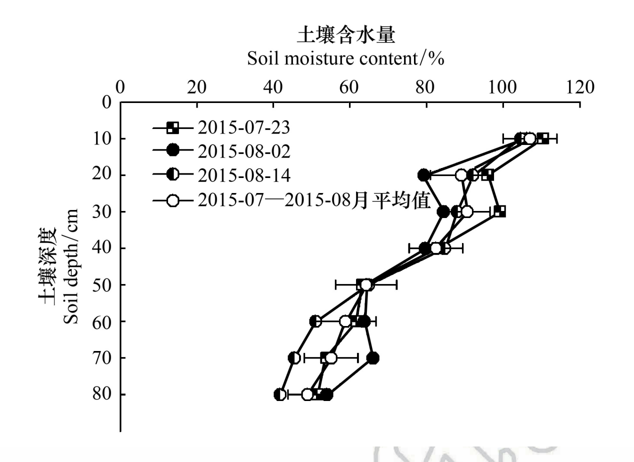


图 5　祁连山东部亚高山灌丛地带土壤剖面含水量变化

Fig.5　Variations of soil water content along soil profiles in the subalpine shrub area of eastern Qilian Mountains

6 种优势植物对地下水的利用虽然较少,但不同时段也有所不同。7 月 23 日至 8 月 2 日,除绣线菊之外地下水对其他植物的贡献率升高,之后至 8 月 14 日,所有植物对地下水的利用率均下降。植物利用地下水可获得稳定水源[10],但地下水位下降可以直接影响土壤水分和养分分布,引起植物对水资源竞争[26]。样区地下水位较低,且本次试验所选植物都是根系分布较浅的灌木,因此地下水的贡献率相对较低。

在自然生态系统中,降水格局以及地下水水位的变化均会影响植物水分利用策略,不同物种对水源利用的分化会影响生态系统的水分平衡、植被对气候变化的响应以及特定地区物种的自然分布格局[27-28]。尽管样区地下水水位较低,加上灌木的根系分布较浅,植物对地下水的利用较少,但头花杜鹃对地下水的平均利用率为 7%,8 月 2 日达到 9.5%。地下水作为稳定水源,在雨水较少且不能补给土壤水时也是植物的重要水源。采样期正值乌鞘岭雨季,植物水源均以降水为主,但 7 月份植物对浅层土壤水的利用较高,绣线菊和头花杜鹃对土壤水的利用率高于其他植物。根系的部分重叠使得植物竞争水分,限制了植物对水分的消耗和植物生长速率[29]。因此,降水量不足可能会影响祁连山东段亚高山灌丛植物生长和发育以及植物功能型的多样性,进而影响整个生态系统的稳定性,尤其是千里香杜鹃、山生柳、金露梅和高山柳。

3　结论

(1)乌鞘岭地区 7—8 月的大气降水线为 $\delta D=7.775\delta^{18}O+12.34$($R^2=0.871$,$P<0.001$),斜率略小于 8,截距较大,说明乌鞘岭地区气温低,湿度大。地下水和河水的 $\delta^{18}O$ 值偏小,位于大气降水线的左上方,但紧靠大气降水线;植物水及土壤水的同位素富集较明显,大部分点位于大气降水线的右下方。土壤水、河水、地下水的大部分点都分布于大气降水线附近,说明降水对河水、地下水以及土壤水有较明显的补给作用。

(2)祁连山东段亚高山灌丛 6 种优势种都对降水利用率最大,其次为 0—10cm 土壤水,地下水对各种植物水分的贡献率最小。植物对 10—80cm 土壤水的利用有先减少后增加再减少的趋势,但对各土层水分利用的比例都较为平均。

(3)祁连山东段亚高山灌丛 6 种植物在不同时段对各水源的利用有明显变化。7 月份,6 种优势植物均主要利用降水和 0—10cm 土壤水,但降水和浅层土壤水对绣线菊、头花杜鹃和千里香杜鹃的贡献率基本持平,其他 3 种植物的水源以降水为主。8 月份,6 种优势植物的主要水源均为降水,0—10cm 土壤水虽有较高

贡献,但远不及降水。绣线菊、高山柳和千里香杜鹃对降水的利用效率高于山生柳、头花杜鹃和金露梅,而后者对深层土壤水的利用效率高于前者。

不同植物有不同的水分利用方式,同一生境中吸水层位相似的植物间存在对水源的竞争现象。在本次试验选取的6种优势种中,绣线菊与头花杜鹃的竞争力尤为明显。采样时段是研究区的雨季,降水成为6种优势植物的主要水源,而土壤水分的补给和地下水位的变化影响植物的水分利用策略,有关6种优势植物与其他植物的水分竞争关系有待于进一步研究。此外,由于7—8月研究区降雨较多,会影响地下水埋深和不同土层的含水量,在以后的研究中,还需要对其他月份或年份进行定量分析,结合灌丛截流、下渗、蒸腾速率等多种因素对植物水分来源的影响,进一步验证结论的可信度。

参考文献(References):

[1] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林. 土层浅薄地区植物水分来源研究方法. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2427-2433.

[2] 张建锋, 周金星. 林木根系衰老研究方法与机制. 生态环境, 2006, 15(2): 405-410.

[3] 张玉翠, 孙宏勇, 沈彦俊, 齐永青. 氢氧稳定同位素技术在生态系统水分耗散中的应用研究进展. 地理科学, 2012, 32(3): 289-293.

[4] Smith S D, Wellington A B, Nachlinger J L, Fox C A. Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversion in the Eastern Sierra Nevada. Ecological Applications, 1991, 1(1): 89-97.

[5] Martorell C, Ezcurra E. Rosette scrub occurrence and fog availability in arid mountains of Mexico. Journal of Vegetation Science, 2002, 13(5): 651-662.

[6] Thorburn P J, Hatton T J, Walker G R. Combining measurements of transpiration and stable isotopes of water to determine groundwater discharge from forests. Journal of Hydrology, 1993, 150(2/4): 563-587.

[7] Querejeta J I, Estrada-Medina H, Allen M F, Jiménez-Osornio J J. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. Oecologia, 2007, 152(1): 26-36.

[8] 褚建民. 干旱区植物的水分选择性利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.

[9] 李鹏菊, 刘文杰, 王平元, 李金涛. 西双版纳石灰山热带季节性湿润林内几种植物的水分利用策略. 云南植物研究, 2008, 30(4): 496-504.

[10] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 张思毅, 李广泳. 青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1091-1100.

[11] 汪有奎, 贾文雄, 刘潮海, 陈文, 赵成章, 王启尤, 汪杰. 祁连山北坡的生态环境变化. 林业科学, 2012, 48(4): 21-26.

[12] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.

[13] 朱建佳, 陈辉, 邢星, 陈同同. 柴达木盆地荒漠植物水分来源定量研究——以格尔木样区为例. 地理研究, 2015, 34(2): 285-292.

[14] 巩国丽. 利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2011.

[15] 朱秀勤. 石林溶丘洼地区不同恢复阶段植物水分利用的稳定同位素研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.

[16] 许士国, 刘盈斐, 孙万光. 扎龙湿地包气带土壤水分垂直运移的稳定同位素研究. 水文, 2006, 26(5): 1-6.

[17] 邢星, 陈辉, 朱建佳, 陈同同. 柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源. 生态学报, 2014, 34(21): 6277-6286.

[18] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355.

[19] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. Oecologia, 1996, 107(1): 13-20.

[20] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 2009, 29(1): 130-137.

[21] 周海, 郑新军, 唐立松, 李彦. 准噶尔盆地东南缘多枝柽柳、白刺和红砂水分来源的异同. 植物生态学报, 2013, 37(7): 665-673.

[22] 张德罡, 曹文侠, 蒲小鹏, 胡自治. 东祁连山杜鹃属植物形态特征及其生态适应性. 草原与草坪, 2003, (1): 27-30, 37-37.

[23] 曹文侠, 李文. 千里香杜鹃根系生物量时空动态特征及其生态适应性. 草业学报, 2016, 25(7): 52-61.

[24] 周华坤, 周立, 赵新全, 沈振西, 李英年, 周兴民, 严作良, 刘伟. 金露梅灌丛地下生物量形成规律的研究. 草业学报, 2002, 11(2): 59-65.

[25] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 王文栋, 何平, 王慧杰, 谢锦. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.

[26] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 徐长春, 张丽华. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. 生态学报, 2007, 27(2): 538-545.

[27] Fowler N. The role of competition in plant communities in arid and semiarid regions. Annual Review of Ecology and Systematics, 1986, 17: 89-110.

[28] Schulze E D, Mooney H A, Sala O E, Jobbagy E, Buchmann N, Bauer G, Canadell J, Jackson R B, Loreti J, Oesterheld M, Ehleringer J R. Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. Oecologia, 1996, 108(3): 503-511.

[29] 陈婕. 内蒙古西鄂尔多斯荒漠珍稀濒危植物水分利用策略[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.